

State of New York)
 : SS:
County of New York)

AFFIDAVIT

On this day, Robert C. Ferber personally appeared before me and after being duly sworn, deposes and states:

1. That he is well qualified as a translator of German to English and is employed as such by Kenyon & Kenyon (One Broadway, New York, New York 10004);

2. That he has carefully reviewed the attached English language translation from the original document,

**Verfahren zur Herstellung von mikromechanischen Strukturen
sowie mikromechanische Struktur**

(Method for producing micromechanical structures and a micromechanical structure)

written in German; and

3. That the attached translation is an accurate English version of such original to the best of his knowledge and belief.


ROBERT C. FERBER

Subscribed and Sworn to before me this
April 6, 2006



Notary Public

MARCIA SIMMS
Notary Public, State of New York
No. 01SI6123479
Qualified in Kings County
Commission Expires March 7, 2009



[10191/3652]

METHOD FOR PRODUCING MICROMECHANICAL STRUCTURES AND A
MICROMECHANICAL STRUCTURE

The present invention relates to a method for producing mechanical structures according to the definition of the species in Claim 1 and a micromechanical structure according to the definition of the species in Claim 6.

5

Background Information

Micromechanical systems may be produced based on multiple material combinations. The production may take place especially using the materials SiGe and Ge. In the case of integrated micromechanical systems, on a regular basis a combination is involved of electronic and mechanical components (e.g. resonators, acceleration sensors and yaw rate sensors). Onto the electronic components, as a rule, a printed circuit trace interconnect layer is applied to connect the mechanical and electronic components. Above that, there is a sacrificial layer, which, in SiGe technology is preferably made of Ge. On top of the sacrificial layer an SiGe functional layer is situated, of which the mechanical components are implemented.

At present, the SiGe functional layer is mostly deposited

using the LPCVD method (LPCVD standing for low pressure chemical vapor deposition). Other methods, which are also used, are epitaxial growth or PECVD (plasma enhanced chemical vapor deposition). However, these methods have not yet advanced sufficiently. The advantages of LPCVD deposition are the low deposition temperature for applying polycrystalline layers, which are particularly important for a „backend integration“. By backend integration is meant the construction of the mechanical components on the electronic components. In addition, the LPCVD method is particularly good for batch processing. One disadvantage of the LPCVD layers is that they have a comparatively high stress gradient. Because of this stress gradient, for example, the individual digits of a comb structure no longer overlap over the entire thickness of the layer or the whole length of the digits, so that the latter's function may be impaired. In the extreme case, at great stress gradients, even movable elements on a substrate are abrasively trimmed.

At this time it is not possible sufficiently to reduce a disadvantageous layer stress gradient during the LPCVD SiGe depositing without exceeding depositing parameter boundaries, such as CMOS-compatible deposit temperatures, or having to use extremely tight process windows which, at the present time, can hardly be kept stable over an entire wafer surface. However, with the current high stress gradients it is not possible to construct acceleration sensors or yaw rate sensors having a large sensor surface and thus also a high resolution. But it is just this area that one would like to open up using the integration of micromechanics and microelectronics.

In SiGe technology, the high stress gradient of functional layers is currently the main reason why there is not yet a large number of integrated micromechanical systems, although the integration with SiGe is a key technology for a large number of new fields of application.

Object and Advantages of the Invention

The present invention is based on the object of improving the functionality of mechanical components in micromechanical systems, such as micromechanical systems especially in the use of SiGe technology, so that even producing comparatively large sensor surfaces, having a high resolution, is possible.

This object is achieved through the features of Claims 1, 5 or 6. Advantageous or expedient embodiments for implementing the present invention are specified in the dependent claims.

First of all, the present invention starts out from a method for producing micromechanical structures in which a functional layer is deposited onto a sacrificial layer, and, for the production of at least one mechanical functional element, the sacrificial layer is removed again. A first essential aspect of the present invention is that a surface barrier layer, which is the beginning of the functional layer on the sacrificial layer, and which has a different state from the remainder of the functional layer, is also removed at least to a considerable part. This procedure is based on the realization that the stress gradient in known structures is essentially caused by the fact that the layer stress at the under side of the layer is different from that at the upper side of the layer, so that free (SiGe, for example) bars arch upwards by a multiple of the layer thickness, and in addition, the difference in the layer stress is caused more or less exclusively by a comparatively thin surface barrier layer on the under side of the functional layer, which, upon the production of the functional layer differs from the remaining functional layer. As a rule, at the under side of the functional layer a compressive stress appears, while at the upper side a low compressive stress or a tensile stress prevails. Thereby is caused, based on this stress difference, a deflection of, for example, bars fixed on one side or a bending of structures that are lying free in an upward

direction, that is, for example, away from a carrier in the direction of the layer surface.

5 The reason for the behavior of the surface barrier layer in the functional layer, which results in the stress gradient having the described effects, is that the crystal structure changes during the depositing. In a manner relatively independent of depositing parameters, mostly an amorphous or very fine crystalline surface layer barrier forms first of
10 all, which has a thickness of between a few 10 nm and a few 100 nm. Along with increasing depositing, the crystallites in the layer keep on becoming bigger, the change in the crystal growth after a certain layer thickness (surface barrier layer), however, not being so great, or changes no longer take
15 place. Thus, the section of the layer in this area of the functional layer is relatively homogeneous with respect to crystal structure. Since the mechanical stress (as well as the thermal coefficient of expansion) of a layer depends very greatly on the crystal structure, the fine-crystalline or
20 amorphous surface barrier layer shows a different stress than the subsequent polycrystalline main layer of the functional layer. That explains why mainly the area of the surface barrier layer is responsible for having the entire functional layer bending, such as upwards, based on a stress gradient.
25 According to the present invention, the surface barrier layer is now removed in the lower region of the functional layer, whereby the cause of the stress gradient is also eliminated. Such a method may be used for all micromechanical structures, and does not necessarily have to be limited to integrated
30 micromechanical systems. The removal of the surface barrier layer may be performed in different ways. What is common to all of them is that the sacrificial layer must really be removed totally or at least partially, since otherwise the surface barrier layer is not freely accessible, and then
35 cannot be removed.

The sacrificial layer is normally made of a material which is

able to be etched to become the functional layer while having a greater or lesser selectivity. That has the advantage that when the sacrificial layer is removed, the functional layer is attacked almost not at all, or to an inconsiderable extent.

5 Say the sacrificial layer is made of Ge, and the functional layer of SiGe, the germanium proportion being less than 65 % to 70 %, in order to achieve sufficient selectivity during sacrificial layer etching between the sacrificial layer and the functional layer. Besides H_2O_2 , almost every other
10 oxidizing fluid is suitable as the sacrificial layer etching agent. The sacrificial layer does not necessarily have to be made of Ge, it may also be constructed of SiGe having a high proportion of germanium. Besides that, other materials, such as silicon dioxide, come into consideration. In that case,
15 hydrofluoric acid (HF) may be used for etching the sacrificial layer. In the case of a comparatively low germanium proportion (less than 65 % to 70 %) in the functional layer, the surface barrier layer may be removed wet-chemically, using etching agents which are used for etching silicon, such as TMAH
20 (tetramethylammonium hydroxide), after the sacrificial layer has been removed. But chemically removing the starting layer using gaseous substances such as ClF_3 , XeF_2 or even in a plasma having an isotropic etching effect is also conceivable. For plasma etching, SF_6 , for example, is suitable. Using such a gas
25 phase method, the etching of the sacrificial layer itself may be carried out, if prior to that, the actual functional elements are suitably passivated.

If the germanium proportion is greater than 65 % to 70 %, then
30 during the sacrificial layer etching of, for example, a pure germanium sacrificial layer using, for instance, H_2O_2 , the functional layer is also attacked. This may be used purposefully in order to remove the surface barrier layer already during the etching of the sacrificial layer. In this
35 case, then, no additional step is necessary for reducing the stress gradient. The selectivity between the sacrificial layer and the functional layer may be set exactly by the germanium

content (e.g. germanium content gradient) of the functional layer.

Let the sacrificial layer be made of germanium and the functional layer be made of SiGe having a germanium proportion of greater than 65 %, which is constant over the entire thickness of the layer. The depositing conditions for the germanium sacrificial layer, which may be, for example, made of two layers, may, for example, for an LPCVD oven be 400 °C, 400 mTorr process pressure, 190 sccm Si₂H₆ gas flow for a duration of ten minutes for a germanium starting layer, and 400 °C, 400 mTorr pressure and 190 sccm GeH₄ gas flow for the germanium sacrificial layer itself. As parameters for the functional layer, for example, 425 °C, 400 mTorr pressure, and for the gas flows 100 sccm SiH₄, 70 sccm GeH₄ and 60 sccm B₂H₆ come into consideration. If this sacrificial layer is etched with H₂O₂, one automatically removes the lower layer of the functional layer and thereby also removes the stress gradient. The selectivity between such a combination of sacrificial layer and functional layer is of an order of magnitude of 1:50. The selectivity and etching time of the sacrificial layer here determines the thickness of the layer removed from the functional layer. Using the present method, for example, 3.5 μm-thick and 500 μm-long bars, made of an appropriately produced functional layer, bend through by less than 1.5 μm with respect to a plane. In this context, the bars having the greatest evenness may demonstrate deflections of less than 0.4 μm per 500 μm bar length. These values are achieved in various boot positions even on wafers, since the method is relatively robust with respect to changes in depositing parameters. However, the deflection of bars whose lower layer was not removed is typically more than ten times as great. In addition, comparatively large divergences may appear from wafer to wafer.

In one further preferred embodiment of the present invention, the functional layer is applied in a composition of the

surface barrier layer as seen in the direction of the remaining functional layer, so that at least a part of the surface barrier layer is able to be etched at least initially selective to the remaining surface barrier layer and/or to the remaining functional layer. By this procedure, the surface barrier layer, for example, may be developed into a sacrificial layer with a relatively small, or no selectivity, whereby, during sacrificial layer etching, the surface barrier layer is removed at the same time, but the functional layer is hardly removed, or not at all.

In particular, it is preferred if the functional layer, in at least one partial area of the surface barrier layer, is deposited, into the remaining functional layer, made of SiGe having a higher proportion of germanium than 65 % to 70 % but less than 100 %, and during the depositing for the remaining functional layer the germanium proportion is reduced, preferably to a proportion of less than 65 % to 70 %. For example, in one and the same oven deposit, directly one after another, without stabilization layers lying in between, the surface barrier layer and the remaining functional layer are deposited. To do this, for example, during the depositing, the flow of germanium is simply lowered after a specified time. In one preferred embodiment of the present invention, a layer having a germanium content of more than 65 % to 70 %, but clearly less than 100 % may be deposited in approximately the thickness of the surface barrier layer, which is responsible for the stress gradient.

Directly upon this, then, the functional layer may be deposited, having a lower germanium content for improved selectivity during sacrificial layer etching. Consequently, during the etching of the sacrificial layer, only the surface barrier layer having a high germanium proportion is removed, but no, or essentially no areas of the functional layer. Consequently, right on target, only the layer of the functional layer is removed which causes the stress gradient,

without one having to adhere to exact time windows in the etching, in this context.

Starting from a method for producing micromechanical
5 structures in which a functional layer is deposited onto a
sacrificial layer, and for the production of at least one
mechanical functional element the sacrificial layer is removed
again, the object is also attained in that one layer or
several layers, having at least closely the same properties
10 with respect to layer stress in the layer or the layers as
seen together as a surface barrier layer, with which the
functional layer begins on the sacrificial layer and which has
a different condition from the remaining functional layer,
is/are applied to the functional layer. Hereby are produced
15 layers having the same stress, on opposite surface areas of
the functional layer, whereby, using a uniform layer between
these layers, a stress neutralization takes place so that no
undesired twisting appears. The application of the additional
layer or the layers onto the functional layer may, for
20 example, be made so that the depositing process is simply
stopped and started again. Thereby is created naturally on the
functional layer a layer which at least approximately has the
same properties as the surface barrier layer has to the
sacrificial layer, since the surface barrier layer was also
25 generated by starting up the process having predefined
depositing parameters. In response to each start-up after a
stop, a layer will at first be formed which corresponds to the
surface barrier layer of the functional layer, if the initial
conditions of the two layers are compatible. This can be
30 achieved, for instance, by a starting layer made of amorphous
silicon.

However, it is also possible to apply another layer onto the
functional layer if the former only has stress behavior that
35 corresponds to the surface barrier layer. Thereby the desired
stress neutralization in the functional layer is then
achieved.

The production methods described have the advantage that thereby functional layers may be generated having comparatively low stress gradients under CMOS-compatible production conditions. The methods are comparatively robust with respect to fluctuations in the depositing parameters, since the stress gradient is not set via the germanium content, the pressure, the temperature of the doping concentration or even a gradient of these parameters. This makes carrying out the process extraordinarily simplified, particularly for batch processes, such as in an LPCVD oven depositing. At the same time, the depositing parameters may be chosen in such a way that the layers are deposited at a comparatively high rate, which is of advantage with regard to economical efficiency. Besides that, fewer test runs are required in establishing a manufacturing method, since manufacturing methods according to the present invention "function" in a large process window.

Also, starting from a micromechanical structure having a functional layer made of SiGe, which, in a lateral region, is especially completely separated from the remainder of the structure, the object is attained in that the functional layer, viewed over its thickness, has such a structure that stresses in the layer are neutralized for the most part, or no stress gradient makes an appearance. That is based on the above-described realization that stress gradients in the functional layer are regularly caused only by a thin layer whose effect may be offset by a layer having appropriate properties.

In the simplest case, the functional layer is preferably constructed at least approximately symmetrical to a center plane through the layer, as seen over its thickness. In a symmetrical layer construction, one may largely assume that a stress-neutral behavior of the layer sandwich appears, towards the outside.

In this connection, it is also advantageous if, with respect to the method described, the functional layer has a surface barrier layer whose effect causing stress gradients is neutralized by an appropriate layer on the upper side.

5 In the simplest case, the functional layer, as viewed in cross section, is homogeneous, at least for the most part. A layer that is per se homogeneous is of necessity stress-neutral. In the case of minor inhomogeneities, a residual stress will set
10 in which, however, frequently is acceptable.

Description of an Exemplary Embodiment

15 In the only figure, an exemplary embodiment is shown of a layer construction for illustrating the present invention. In a schematic cross section, the figure shows a typical construction of an SiGe functional layer 1. Functional layer 1 has on its lower side a surface barrier layer 2, which is made up of amorphous or very small crystallites. Remaining
20 functional layer 3 is next to surface barrier layer 2. Remaining functional layer 3 is made up of comparatively large crystallites, which to a great extent are uniform over the entire thickness of this layer. Therefore, this layer, as seen over its thickness d , has an essentially constant layer
25 stress. The constant layer stress is either a comparatively slight tensile stress or compressive stress, which are symbolized by arrows 4 in layer 3.

30 By contrast, in surface barrier layer 2, a substantially greater compressive stress prevails (symbolized by arrows 5), with the result that the layer in the figure bends up towards the top.

35 According to the present invention, only two types of thing can happen, then.

1. Either surface barrier layer 2 is removed, whereby a

remaining functional layer 3 is obtained, which is per se largely homogeneous, and, in view of that, shows no substantial stress gradients, which would lead to an undesired deformation of the layer.

5

2. One or more additional layer(s) is/are applied to layer 3, which has(have) comparable stress properties to surface barrier layer 5. Hereby the high compressive stresses in the surface barrier layer are able to be compensated for by correspondingly high compressive stresses on the upper side of the layer construction.

10

What Is Claimed Is:

1. A method for producing micromechanical structures in which a functional layer (1) is deposited onto a sacrificial layer, and, for the production of at least one mechanical functional element, the sacrificial layer is removed again, which is characterized in that a surface barrier layer (2), with which the functional layer (1) on the sacrificial layer begins, and which has a different state from the remaining functional layer (3), is also removed, at least to a considerable part.
2. The method as recited in Claim 1, wherein the functional layer (1) is applied in a composition of the surface barrier layer (2) as seen in the direction of the remaining functional layer (3); at least one part of the surface barrier layer (2) is able to be etched at least initially selective to the remaining surface barrier layer (2) and/or to the remaining functional layer (3).
3. The method as recited in Claim 2, wherein the functional layer (1), in at least one partial area of the surface barrier layer (2), is deposited preferably all the way into the remaining functional layer (3), made of SiGe having a higher proportion of germanium than 65 % to 70 %, but less than 100 %, and during the depositing for the remaining functional layer (3) the germanium proportion is reduced, preferably to a proportion of less than 65 % to 70 %.
4. The method as recited in one of the preceding claims, wherein the functional layer (1) is applied completely in a composition which demonstrates no, or only a weak selectivity for the sacrificial layer.

5. The method according to the definition of the species in Claim 1, in particular as recited in one of the preceding claims,
wherein one layer or a plurality of layers having at least approximately the same properties with respect to the stress in the layer or layers, such as the surface barrier layer (2), with which the functional layer (1) begins on the sacrificial layer and which has a different state from the remaining functional layer (3), is(are) applied to the functional layer (1).
6. A micromechanical structure having a functional layer (1) made of SiGe which is separated from the remaining structure by a lateral region,
wherein the functional layer (1), as seen over its thickness d , has a construction so that stresses in the layer are neutralized, at least for the most part, or that no stress gradient appears.
7. The structure as recited in Claim 6,
wherein the functional layer (1), as seen over its thickness d , is constructed at least approximately symmetrically to a center plane through the layer.
8. The structure as recited in Claim 6 or 7,
wherein the functional layer (1) in each case has a surface barrier layer on opposite surfaces, which differs from the remaining functional layer (3).
9. The structure as recited in Claims 6 to 8,
wherein the functional layer (1) is at least approximately homogeneous, as seen over its cross section.

Abstract

A method is proposed for producing micromechanical structures, in which a functional layer (1) is deposited onto a
5 sacrificial layer, and the sacrificial layer is removed again for the production of at least one mechanical functional element, which is characterized by a surface barrier layer (2), with which the functional layer (1) begins on the sacrificial layer, and which has a different state from the
10 remaining functional layer (3), is also removed at least to a considerable part, or, on the functional layer, one layer or a plurality of layers having at least approximately the same properties with respect to stress in the layer or layers such as the surface barrier layer is(are) applied. Additionally, a
15 micromechanical structure is proposed having a functional layer in which the functional layer is constructed in such a way that the stresses are neutralized or no stress gradient appears.



R. 304989

"Verfahren zur Herstellung von mikromechanischen Strukturen sowie mikromechanische Struktur"

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Herstellung von mikromechanischen Strukturen nach dem Oberbegriff des Anspruchs 1 bzw. eine mikromechanische Struktur nach dem Oberbegriff des Anspruchs 6.

Stand der Technik

Mikromechanische Systeme können auf der Grundlage vielfältiger Materialkombinationen hergestellt werden. Die Herstellung kann insbesondere mit den Werkstoffen SiGe und Ge erfolgen. Bei integrierten mikromechanischen Systemen handelt es sich regelmäßig um eine Kombination aus elektronischen und mechanischen (z.B. Resonatoren, Beschleunigungs- und Drehratensensoren) Komponenten. Auf die elektronischen Komponenten wird in der Regel eine Leiterbahnebene zur Verbindung der mechanischen und elektronischen Komponenten aufgebracht. Darüber befindet sich eine Opferschicht, die bei einer SiGe-Technologie vorzugsweise aus Ge besteht. Auf der Opferschicht wird eine SiGe-Funktionsschicht angeordnet, aus der die mechanischen Komponenten realisiert sind.

Derzeit wird die SiGe-Funktionsschicht meist mit LPCVD-Verfahren (LPCVD steht für low pressure chemical vapour deposition) abgeschieden. Andere Verfahren, die ebenfalls zum Einsatz kommen, sind epitaktisches Aufwachsen oder PECVD (plasma enhanced chemical vapour deposition). Diese Verfahren

sind jedoch noch nicht in ausreichender Weise fortgeschritten. Die Vorteile der LPCVD-Abscheidung liegen in einer niedrigen Abscheidetemperatur für das Aufbringen polykristalliner Schichten, die für eine "Backend-Integration" besonders wichtig sind. Unter einer Backend-Integration versteht man den Aufbau der mechanischen Komponenten auf den elektronischen Komponenten. Außerdem eignet sich das LPCVD-Verfahren besonders gut für eine Batch-Prozessierung. Ein Nachteil der LPCVD-Schichten liegt aber darin, dass diese einen vergleichsweise hohen Stressgradienten aufweisen. Durch diesen Stressgradienten überlappen sich z.B. die einzelnen Finger einer Kammstrukturanordnung nicht mehr über die vollständige Dicke der Schicht bzw. die gesamte Länge der Finger, so dass deren Funktion beeinträchtigt sein kann. Im Extremfall schleifen bei großen Stressgradienten sogar bewegliche Elemente auf einem Substrat.

Derzeit ist es nicht möglich, einen nachteiligen Schichtspannungsgradienten während der LPCVD-SiGe-Abscheidung ausreichend zu reduzieren, ohne Abscheideparametergrenzen, wie z.B. CMOS-kompatible Abscheidetemperaturen zu überschreiten oder extrem enge Prozessfenster, die derzeit kaum über eine gesamte Waferfläche stabil gehalten werden können, verwenden zu müssen. Mit den derzeitigen hohen Stressgradienten ist es jedoch nicht möglich, Beschleunigungs- oder Drehratensensoren mit einer großen Sensorfläche und damit auch hohen Auflösung zu bauen. Gerade diesen Bereich möchte man aber mit der Integration von Mikromechanik und Mikroelektronik erschließen.

Bei der SiGe-Technologie ist der hohe Stressgradient von Funktionsschichten derzeit der Hauptgrund, weshalb es noch keine große Zahl von integrierten mikromechanischen Systemen gibt, obgleich die Integration mit SiGe eine Schlüsseltechnologie für eine Vielzahl neuer

Anwendungsgebiete ist.

Aufgabe und Vorteile der Erfindung

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, die Funktionalität von mechanischen Komponenten in mikromechanischen Systemen, z.B. integrierten mikromechanischen Systemen, insbesondere bei Verwendung einer SiGe-Technologie zu verbessern, so dass auch eine Herstellung vergleichsweise großer Sensorflächen mit hoher Auflösung möglich wird.

Diese Aufgabe wird durch die Merkmale der Ansprüche 1, 5 oder 6 gelöst. In den Unteransprüchen sind vorteilhafte oder zweckmäßige Ausgestaltungen der Erfindung angegeben.

Zunächst geht die Erfindung von einem Verfahren zur Herstellung von mikromechanischen Strukturen aus, bei welchem auf eine Opferschicht eine Funktionsschicht abgeschieden und für die Herstellung von wenigstens einem mechanischen Funktionselement die Opferschicht wieder entfernt wird. Ein erster wesentlicher Aspekt der Erfindung liegt darin, dass eine Randschicht, mit welcher die Funktionsschicht auf der Opferschicht beginnt und die eine andere Beschaffenheit wie die übrige Funktionsschicht aufweist, zumindest zu einem erheblichen Teil ebenfalls entfernt wird. Dieser Vorgehensweise liegt die Erkenntnis zugrunde, dass der Stressgradient in bekannten Strukturen im Wesentlichen dadurch verursacht wird, dass die Schichtspannung auf der Unterseite der Schicht eine andere ist als auf der Oberseite der Schicht, sodass sich freie z.B. SiGe-Balken teilweise um ein Vielfaches der Schichtdicke nach oben wölben und darüber hinaus der Schichtspannungsunterschied mehr oder weniger ausschließlich von einer vergleichsweise dünnen Randschicht auf der Unterseite der Funktionsschicht verursacht wird, die bei der Herstellung der Funktionsschicht sich von der übrigen

Funktionsschicht unterscheidet. In der Regel tritt an der Unterseite der Funktionsschicht eine Druckspannung auf, während an der Oberseite eine niedrigere Druckspannung bzw. eine Zugspannung herrscht. Hierdurch ergibt sich aufgrund dieses Spannungsunterschieds eine Auslenkung von z.B. einseitig eingespannten Balken bzw. eine Verbiegung freiliegender Strukturen in eine Richtung nach oben, also von z.B. einem Träger weg in Richtung der Schichtoberfläche.

Die Ursache des Verhaltens der Randschicht in der Funktionsschicht, die den Spannungsgradienten mit beschriebenen Auswirkungen zur Folge hat, liegt darin, dass sich die Kristallstruktur während der Abscheidung verändert. Relativ unabhängig von Abscheideparametern bildet sich meist zuerst eine amorphe bzw. sehr fein kristalline Randschicht aus, welche zwischen einigen 10 nm und einigen 100 nm dick ist. Mit fortschreitender Abscheidung, werden die Kristallite in der Schicht immer größer, wobei jedoch die Änderung der Kristallgröße nach einer gewissen Schichtdicke (Randschicht) nicht mehr so stark ist bzw. keine Änderung mehr stattfindet. Damit ist der Abschnitt der Schicht in diesem Bereich der Funktionsschicht im Hinblick auf die Kristallstruktur relativ homogen. Da die mechanische Spannung (sowie der thermische Ausdehnungskoeffizient) einer Schicht sehr stark von der Kristallstruktur abhängt, zeigt die feinkristalline bzw. amorphe Randschicht eine andere Spannung als die darauffolgende polykristalline Hauptschicht der Funktionsschicht. Das erklärt, warum hauptsächlich der Bereich der Randschicht dafür verantwortlich ist, dass sich die gesamte Funktionsschicht aufgrund eines Stressgradienten z.B. nach oben verbiegt. Erfindungsgemäß wird nun die Randschicht im unteren Bereich der Funktionsschicht abgetragen, womit auch die Ursache des Stressgradienten beseitigt ist. Ein solches Verfahren kann bei allen mikromechanischen Strukturen zur Anwendung kommen und muss nicht notwendigerweise auf integrierte mikromechanische

Systeme beschränkt sein. Das Abtragen der Randschicht kann auf unterschiedliche Arten erfolgen. Ihnen gemeinsam ist, dass die Opferschicht bereits ganz oder zumindest teilweise entfernt sein muss, da sonst die Randschicht nicht frei zugänglich ist und dann nicht abgetragen werden kann.

Regelmäßig wird die Opferschicht aus einem Material hergestellt, das sich mit einer mehr oder weniger großen Selektivität zur Funktionsschicht ätzen lässt. Das hat den Vorteil, dass beim Entfernen der Opferschicht die Funktionsschicht nahezu gar nicht oder in einem nicht erheblichen Ausmaß angegriffen wird. Beispielsweise besteht die Opferschicht aus Ge und die Funktionsschicht aus SiGe, wobei der Germaniumanteil kleiner als 65% bis 70% ist, um eine ausreichende Selektivität beim Opferschichtätzen zwischen der Opferschicht und der Funktionsschicht zu erzielen. Als Opferschicht-Ätze eignet sich neben H_2O_2 fast jede andere oxidierende Flüssigkeit. Die Opferschicht muss nicht zwangsläufig aus Ge bestehen, sie kann auch aus SiGe mit einem hohen Germaniumanteil aufgebaut sein. Daneben kommen auch andere Werkstoffe, wie z.B. Siliziumdioxid in Frage. In diesem Fall kann dann Flusssäure (HF) zum Opferschichtätzen zum Einsatz kommen. Im Fall eines vergleichsweise niedrigen Germaniumanteils (kleiner 65% bis 70%) in der Funktionsschicht kann die Randschicht z.B. nasschemisch mit Ätzen, die zum Siliziumätzen eingesetzt werden, wie z.B. TMAH (Tetramethylammoniumhydroxid) abgetragen werden, nachdem die Opferschicht entfernt ist. Denkbar ist aber auch ein chemisches Entfernen der Startschicht mit gasförmigen Stoffen wie z.B. ClF_3 , XeF_2 oder auch in einem Plasma mit isotroper Ätzwirkung. Zum Plasmaätzen eignet sich z.B. SF_6 . Mit einem solchen Verfahren aus der Gasphase kann auch die Opferschichtätzung selbst durchgeführt werden, wenn die eigentlichen Funktionselemente zuvor geeignet passiviert wurden.

Ist der Germaniumanteil der Funktionsschicht größer als 65% bis 70% so wird beim Opferschichtätzen einer z.B. reinen Germanium-Opferschicht mit beispielsweise H_2O_2 auch die Funktionsschicht angegriffen. Dies kann gezielt genutzt werden, um die Randschicht bereits während des Opferschichtätzens zu entfernen. Hierbei ist dann kein zusätzlicher Schritt notwendig, um den Stressgradienten zu reduzieren. Die Selektivität zwischen Opferschicht und Funktionsschicht kann durch den Germaniumgehalt (z.B. Germaniumgehaltgradienten) der Funktionsschicht exakt eingestellt werden.

Beispielsweise besteht die Opferschicht aus Germanium und die Funktionsschicht aus SiGe mit einem Germaniumanteil von größer als 65%, der über die gesamte Schichtdicke konstant ist. Die Abscheidebedingungen für die Germaniumopferschicht, welche z.B. aus zwei Lagen bestehen kann, können z.B. für einen LPCVD-Ofen $400^\circ C$, 400 mTorr Prozessdruck, 190 sccm Si_2H_6 Gasfluss für eine Dauer von zehn Minuten für eine Germaniumstartschicht und $400^\circ C$, 400 mTorr Druck und 190 sccm GeH_4 Gasfluss für die Germaniumopferschicht selbst sein. Als Parameter für die Funktionsschicht kommen z.B. $425^\circ C$, 400 mTorr Druck und für die Gasflüsse 100 sccm SiH_4 , 70 sccm GeH_4 sowie 60 sccm B_2H_6 in Frage. Wird diese Opferschicht mit H_2O_2 geätzt, so entfernt man automatisch die untere Schicht der Funktionsschicht und beseitigt damit auch den Stressgradienten. Die Selektivität zwischen einer solchen Kombination von Opferschicht und Funktionsschicht liegt in der Größenordnung von 1:50. Die Selektivität und Ätzzeit der Opferschicht bestimmt hier die von der Funktionsschicht abgetragene Schichtdicke. Mit dem vorliegenden Verfahren biegen sich z.B. $3,5\ \mu m$ dicke und $500\ \mu m$ lange Balken aus einer entsprechend hergestellten Funktionsschicht um weniger als $1,5\ \mu m$ in Bezug auf eine Ebene durch. Die Balken mit der größten Ebenheit können dabei Auslenkungen von weniger als $0,4\ \mu m$ bei $500\ \mu m$ Balkenlänge zeigen. Diese Werte werden

selbst auf Wafern in verschiedenen Bootpositionen erreicht, da das Verfahren relativ robust im Hinblick auf Abscheideparameteränderungen ist. Die Auslenkung von Balken deren unterste Schicht dagegen nicht entfernt wurde, ist typischerweise mehr als zehnmal so groß. Hinzu kommt, dass vergleichsweise große Streuungen von Wafer zu Wafer auftreten.

In einer weiteren bevorzugten Ausgestaltung der Erfindung wird die Funktionsschicht in einer Zusammensetzung von der Randschicht in Richtung übrige Funktionsschicht betrachtet aufgebracht, dass sich wenigstens ein Teil der Randschicht zumindest ansatzweise selektiv zur verbleibenden Randschicht und/oder zur verbleibenden Funktionsschicht ätzen lässt. Durch diese Vorgehensweise kann z.B. die Randschicht mit einer relativ kleinen oder gar keinen Selektivität zur Opferschicht ausgestaltet werden, wodurch beim Opferschichtätzen gleichzeitig die Randschicht entfernt wird, aber dennoch die Funktionsschicht kaum oder gar nicht abgetragen wird.

Insbesondere ist es bevorzugt, wenn die Funktionsschicht in wenigstens einem Teilbereich der Randschicht vorzugsweise bis in die verbleibende Funktionsschicht hinein aus SiGe mit einem höheren Germaniumanteil als 65% bis 70% aber kleiner als 100% abgeschieden und bei der Abscheidung für die verbleibende Funktionsschicht der Germaniumanteil reduziert wird, vorzugsweise unter einen Anteil von 65% bis 70%. Beispielsweise wird in ein und derselben Ofenabscheidung direkt nacheinander ohne dazwischenliegende Stabilisierungsschichten die Rand- und dann die verbleibende Funktionsschicht abgeschieden. Hierzu wird z.B. während der Abscheidung einfach der Germanfluss nach einer vorgegebenen Zeit gesenkt. Bei einer bevorzugten Ausgestaltung der Erfindung kann ungefähr in der Dicke der Randschicht, welche für den Stressgradienten verantwortlich ist, eine Schicht mit

einem Germaniumgehalt von größer 65% bis 70% aber deutlich kleiner als 100% abgeschieden werden.

Direkt darauf kann dann die Funktionsschicht mit niedrigerem Germaniumgehalt für eine verbesserte Selektivität beim Opferschichtätzen deponiert werden. Beim Opferschichtätzen wird somit nur die Randschicht mit hohem Germaniumanteil entfernt, jedoch keine oder im Wesentlichen keine Bereiche der Funktionsschicht. Zielgenau wird somit nur die Schicht von der Funktionsschicht entfernt, die den Stressgradienten verursacht, ohne dabei beim Ätzen exakte Zeitfenster einhalten zu müssen.

Die Aufgabe wird ausgehend von einem Verfahren zur Herstellung von mikromechanischen Strukturen, bei welchen auf eine Opferschicht, eine Funktionsschicht abgeschieden und für die Herstellung von wenigstens einem mechanischen Funktionselement die Opferschicht wieder entfernt wird, auch dadurch gelöst, dass eine Schicht oder mehrere Schichten mit zumindest annähernd gleichen Eigenschaften im Hinblick auf die Schichtspannung in der Schicht bzw. den Schichten zusammen betrachtet wie eine Randschicht, mit welcher die Funktionsschicht auf der Opferschicht beginnt und die eine andere Beschaffenheit wie die übrige Funktionsschicht aufweist, auf die Funktionsschicht aufgebracht wird bzw. werden. Hierdurch werden auf gegenüberliegenden Oberflächenbereichen der Funktionsschicht Schichten mit gleicher Spannung erzeugt, wodurch mit einer gleichmäßigen Schicht zwischen diesen Schichten eine Spannungsneutralisation erfolgt, so dass keine unerwünschten Verbiegungen auftreten. Das Aufbringen der weiteren Schicht bzw. Schichten auf der Funktionsschicht kann z.B. dadurch erfolgen, dass der Abscheideprozess einfach gestoppt und wieder angefahren wird. Damit entsteht auf der Funktionsschicht naturgemäß eine Schicht, die zumindest annähernd gleiche Eigenschaften wie die Randschicht zur

Opferschicht aufweist, da auch die Randschicht durch Anfahren des Prozesses mit vorgegebenen Abscheideparametern entstanden ist. Bei jedem Neuanfahren nach einem Stopp wird sich zunächst eine Schicht etablieren, die der Randschicht der Funktionsschicht entspricht, wenn die Startbedingungen der beiden Schichten vergleichbar sind. Das kann z.B. durch eine Startschicht aus amorphem Silizium erreicht werden.

Es ist jedoch auch möglich, eine andere Schicht auf die Funktionsschicht aufzubringen, wenn diese nur entsprechendes Spannungsverhalten wie die Randschicht besitzt. Damit lässt sich dann die gewünschte Spannungsneutralisation in der Funktionsschicht erreichen.

Die beschriebenen Herstellungsverfahren haben den Vorteil, dass sich hierdurch Funktionsschichten mit vergleichsweise niedrigem Stressgradienten bei CMOS kompatiblen Herstellungsbedingungen erzeugen lassen. Die Verfahren sind vergleichsweise robust im Hinblick auf Schwankungen der Abscheideparameter, da der Stressgradient nicht über den Germaniumgehalt, den Druck, die Temperatur die Dotierkonzentration oder gar einen Gradienten dieser Parameter eingestellt wird. Dies erleichtert außerordentlich die Prozessführung, insbesondere bei Batchprozessen, z.B. mit einer LPCVD-Ofenabscheidung. Gleichzeitig können die Abscheideparameter so gewählt werden, dass die Schichten mit einer vergleichsweise hohen Rate deponiert werden, was im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit von Vorteil ist. Es sind außerdem weniger Testläufe erforderlich, um ein Herstellungsverfahren einzufahren, da die erfindungsgemäßen Herstellungsverfahren in einem großen Prozessfenster "funktionieren".

Die Aufgabe wird außerdem ausgehend von einer mikromechanischen Struktur mit einer Funktionsschicht aus SiGe, die in einem lateralen Bereich, insbesondere

vollständig vom übrigen Aufbau getrennt ist, dadurch gelöst, dass die Funktionsschicht über ihre Dicke betrachtet einen Aufbau derart aufweist, dass sich Spannungen in der Schicht zumindest zum Großteil neutralisieren oder kein Spannungsgradient auftritt. Dem liegt die oben beschriebene Erkenntnis zugrunde, dass Spannungsgradienten in der Funktionsschicht regelmäßig nur von einer dünnen Schicht verursacht werden, deren Auswirkungen durch eine Schicht mit entsprechenden Eigenschaften ausgeglichen werden kann.

Im einfachsten Fall ist die Funktionsschicht bevorzugt über ihre Dicke betrachtet zumindest annähernd symmetrisch zu einer Mittelebene durch die Schicht aufgebaut. Bei einem symmetrischen Schichtaufbau kann weitgehend davon ausgegangen werden, dass nach außen hin ein spannungsneutrales Verhalten des Schichtsandwiches auftritt.

In diesem Zusammenhang ist es außerdem vorteilhaft, wenn wie im Hinblick auf das Verfahren beschrieben, die Funktionsschicht eine Randschicht aufweist, deren Spannungsgradienten verursachende Wirkung durch eine entsprechende Schicht auf der Oberseite neutralisiert ist.

Im einfachsten Fall ist die Funktionsschicht über ihren Querschnitt betrachtet zumindest größtenteils homogen. Eine in sich homogene Schicht ist zwangsläufig spannungsneutral. Bei geringen Inhomogenitäten wird sich eine geringe Restspannung einstellen, die jedoch vielfach akzeptabel ist.

Beschreibung eines Ausführungsbeispiels

In der einzigen Figur ist ein Ausführungsbeispiel eines Schichtaufbaus zur Veranschaulichung der Erfindung dargestellt. Die Figur zeigt in einem schematischen Querschnitt einen typischen Aufbau einer SiGe-

Funktionsschicht 1. Die Funktionsschicht 1 weist auf der Unterseite eine Randschicht 2 auf, die aus amorphen oder sehr kleinen Kristalliten besteht. Auf die Randschicht 2 folgt die verbleibende Funktionsschicht 3. Die verbleibende Funktionsschicht 3 besteht aus vergleichsweise großen Kristalliten, die über die gesamte Dicke dieser Schicht weitgehend gleichmäßig sind. Daher weist diese Schicht über ihre Dicke d betrachtet, eine im Wesentlichen konstante Schichtspannung auf. Die konstante Schichtspannung ist entweder eine vergleichsweise geringe Zug- oder Druckspannung, die durch die Pfeile 4 in der Schicht 3 symbolisiert ist.

Demgegenüber herrscht in der Randschicht 2 eine wesentlich größere Druckspannung (durch Pfeile 5 symbolisiert), die zur Folge hat, dass sich die Schicht in der Figur nach oben aufbiegt.

Erfindungsgemäß können nur zweierlei Dinge erfolgen.

1. Entweder wird die Randschicht 2 entfernt, womit eine verbleibende Funktionsschicht 3 erhalten wird, die in sich weitgehend homogen ist und damit keinen wesentlichen Spannungsgradienten zeigt, der zu einer unerwünschten Verformung der Schicht führen würde.

2. Auf die Schicht 3 wird (werden) eine (oder mehrere) weitere Schicht (Schichten) aufgebracht, die ein zur Randschicht 5 vergleichbares Spannungsverhalten besitzt (besitzen). Hierdurch können die hohen Druckspannungen in der Randschicht durch entsprechende hohe Druckspannungen auf der Oberseite des Schichtaufbaus kompensiert werden.

Patentansprüche:

1. Verfahren zur Herstellung von mikromechanischen Strukturen, bei welchen auf eine Opferschicht eine Funktionsschicht (1) abgeschieden und für die Herstellung von wenigstens einem mechanischen Funktionselement die Opferschicht wieder entfernt wird, dass dadurch gekennzeichnet ist, dass eine Randschicht (2), mit welcher die Funktionsschicht (1) auf der Opferschicht beginnt und die eine andere Beschaffenheit wie die übrige Funktionsschicht (3) aufweist, zumindest zu einem erheblichen Teil ebenfalls entfernt wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Funktionsschicht (1) in einer Zusammensetzung von der Randschicht (2) in Richtung übrige Funktionsschicht (3) betrachtet aufgebracht wird, dass sich wenigstens ein Teil der Randschicht (2) zumindest ansatzweise selektiv zur verbleibenden Randschicht (2) und/oder zur verbleibenden Funktionsschicht (3) ätzen lässt.
3. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass die Funktionsschicht (1) in wenigstens einem Teilbereich der Randschicht (2), vorzugsweise bis in die verbleibende Funktionsschicht (3) hinein aus SiGe mit einem höheren Germaniumanteil als 65% bis 70%, aber kleiner als 100% abgeschieden und bei der Abscheidung für die verbleibende Funktionsschicht (3) der Germaniumanteil reduziert wird, vorzugsweise unter einen Anteil von 65% bis 70%.
4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Funktionsschicht (1) vollständig in einer Zusammensetzung aufgebracht wird, die keine oder eine nur schwache Selektivität zur Opferschicht zeigt.

5. Verfahren nach dem Oberbegriff des Anspruchs 1, insbesondere nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass eine Schicht oder mehrere Schichten mit zumindest annähernd gleichen Eigenschaften im Hinblick auf die Spannung in der Schicht oder den Schichten wie die Randschicht (2), mit welcher die Funktionsschicht (1) auf der Opferschicht beginnt und die eine andere Beschaffenheit wie die übrige Funktionsschicht (3) aufweist, auf die Funktionsschicht (1) aufgebracht wird bzw. werden.

6. Mikromechanische Struktur mit einer Funktionsschicht (1) aus SiGe die über einen lateralen Bereich vom übrigen Aufbau getrennt ist, dadurch gekennzeichnet, dass die Funktionsschicht (1) über ihre Dicke d betrachtet einen Aufbau derart aufweist, dass sich Spannungen in der Schicht zumindest zum Großteil neutralisieren oder kein Spannungsgradient auftritt.

7. Struktur nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass die Funktionsschicht (1) über ihre Dicke d betrachtet zumindest annähernd symmetrisch zu einer Mittelebene durch die Schicht aufgebaut ist.

8. Struktur nach Anspruch 6 oder 7, dadurch gekennzeichnet, dass die Funktionsschicht (1) auf gegenüberliegenden Flächen jeweils eine Randschicht aufweist, die sich von der übrigen Funktionsschicht (3) unterscheidet.

9. Struktur nach einem der Ansprüche 6 bis 8, dadurch gekennzeichnet, dass die Funktionsschicht (1) über ihren Querschnitt betrachtet zumindest annähernd homogen ist.

Zusammenfassung:

Es wird ein Verfahren zur Herstellung von mikromechanischen Strukturen vorgeschlagen, bei welchem auf eine Opferschicht eine Funktionsschicht (1) abgeschieden und für die Herstellung von wenigstens einem mechanischen Funktionselement die Opferschicht wieder entfernt wird, dass sich dadurch auszeichnet, dass eine Randschicht (2), mit welcher die Funktionsschicht (1) auf der Opferschicht beginnt und die eine andere Beschaffenheit wie die übrige Funktionsschicht (3) aufweist, zumindest zu einem erheblichen Teil ebenfalls entfernt wird oder auf der Funktionsschicht eine Schicht oder mehrere Schichten mit zumindest annähernd gleichen Eigenschaften im Hinblick auf die Spannung in der Schicht bzw. den Schichten wie die Randschicht aufgebracht wird bzw. werden. Außerdem wird eine mikromechanische Struktur mit einer Funktionsschicht vorgeschlagen, bei welcher die Funktionsschicht so aufgebaut ist, dass sich Spannungen neutralisieren oder kein Spannungsgradient auftritt.